

THE INFLUENCE OF SUPERFICIAL VELOCITY AND BUBBLE HOLD-UP IN A VERTICAL AERATOR COLUMN TO THE OXYGEN TRANSFER COEFFICIENT

PENGARUH KECEPATAN SUPERFISIAL DAN *HOLD-UP* GELEMBUNG UDARA PADA KOLOM AERATOR VERTIKAL TERHADAP KOEFISIEN TRANSFER OKSIGEN

Adam Pamudji R¹⁾, Rochmadi²⁾, Budi Kamulyan¹⁾

¹⁾ Staf pengajar Jurusan Teknik Sipil dan Lingkungan, FT UGM, email: adam@yahoo.com

²⁾ Staf pengajar Jurusan Teknik Kimia, FT UGM

ABSTRACT

To optimize aeration process in a waste water treatment aeration tank, numerical model analyses can be utilized. However, it is necessary to understand the dynamics of air bubble flow within the aeration tank and the oxygen mass transfer from within bubbles to the body of water or waste water. A research for obtaining the relationship between the oxygen mass transfer and the bubble concentration and size has been conducted. Before conducting some experiments involving bubble flow dynamics and oxygen mass transfer measurements, some previous research results on the related subjects was elaborated. Two conditions were considered, those are the bubble flow dynamics and oxygen mass transfer within plain water and within water with artificial sludge. The measurements were done in a two millimeter thick glass walled aerator column of 95 x 95 x 300 mm size. Spargers for air injection were placed on the bottom of the aerator column. Air compressor was used in order to push the air into the bottom of the aerator column. For measuring the discharge of the air flow a rotta meter was installed between the air compressor and the spargers. The bubble dynamics was observed using digital image analyses by a video camera, computers and video capture and image analysis softwares. The oxygen mass transfer was measured through the change of Natrium Sulfide concentration that was added into the water. Cobalt was used as catalist for speeding up the reaction process so that the reaction proses was not controlling the rate of the whole sequence of mass transfer and reaction processes. The result of the research indicates that the individual bubble size remains constant between 3.4 and 3.7 mm within the superficial velocity variation range of between 0.09 and 0.19 cm/s. Furthermore, for any value of superficial velocity, the presence of the artificial sludge increasing the bubble concentration or bubble hold-up. The oxygen mass transfer coefficient appears to be positively influenced by the superficial velocity.

Key Words : Superficial Velocity, Bubble Hold-up, Oxygen Transfer Coefficient, Vertical Aerator Column

ABSTRAK

Upaya untuk mendapatkan proses aerasi yang optimal pada kolam aerasi pengolahan limbah cair dapat dilakukan dengan pemodelan secara numerik. Namun demikian diperlukan pengetahuan tentang dinamika gelembung udara dan perpindahan massa oksigen dari gelembung udara ke air. Penelitian untuk mendapatkan hubungan laju perpindahan oksigen dari gelembung udara ke air terhadap konsentrasi dan ukuran gelembung udara telah dilakukan. Beberapa hasil penelitian terdahulu yang terkait dengan fenomena tersebut dielaborasi sebelum dilakukan beberapa eksperimen dengan pengukuran dinamika gelembung udara dan perubahan kandungan oksigen dalam air maupun dalam air dengan lumpur tiruan. Pengamatan dilakukan pada kolom aerator vertikal dengan ukuran 95 x 95 x 300 mm. Sparger untuk memasukkan udara dipasang di dasar kolom aerator. Kompresor udara dihubungkan ke sparger melalui sebuah rotameter untuk mengukur debit aliran udara yang dipompa ke dasar kolom aerator. Pengukuran dinamika gelembung udara dilakukan dengan analisis digital rekaman video proses aerasi. Laju perpindahan massa oksigen diukur melalui pengamatan perubahan konsentrasi Natrium Sulfit yang dilarutkan dalam air. Katalisator garam Cobalt digunakan untuk menjaga agar kecepatan reaksi oksidasi bukan sebagai kecepatan yang mengontrol rangkaian proses perpindahan massa dan reaksi secara keseluruhan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa ukuran diameter gelembung udara relatif tetap diantara 3,4 dan 3,7 mm untuk variasi kecepatan superficial antara 0,09 sampai dengan 0,19 cm/s. Untuk tiap nilai kecepatan superficial tertentu adanya lumpur tiruan memberikan konsentrasi gelembung udara yang lebih besar. Analisis pencarian koefisien perpindahan massa oksigen menunjukkan bahwa nilai koefisien tersebut dipengaruhi oleh kecepatan superficial.

Kata-kata Kunci : kecepatan superficial, hold-up gelembung udara, koefisien transfer oksigen, kolom aerator vertikal

PENDAHULUAN

Proses aerasi pada air limbah dapat ditempuh dengan dua cara, yang pertama yaitu memasukkan udara ke dalam air limbah dan yang kedua memaksa air ke atas permukaan untuk berkontak dengan udara (oksigen). Cara yang kedua ditempuh dengan menggunakan mekanik *aerator* yang mempunyai baling – baling sehingga mampu menciptakan turbulensi air di saat kontak udara dengan air. Untuk mendapatkan aerasi yang optimum maka laju perpindahan oksigen perlu diketahui, oleh karena itu (sehingga) pada penelitian ini dilakukan pengukuran laju perpindahan oksigen.

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui laju perpindahan oksigen dari gelembung udara ke air dan untuk mengetahui pengaruh konsentrasi dan ukuran gelembung udara terhadap laju perpindahan oksigen dari gelembung udara ke air dalam kolom

aerator dengan sebaran gelembung udara merata. Ukuran gelembung diamati dengan merekam gerakan gelembung, menggunakan video.

Thoenes (1994), menyatakan bahwa kolom gelembung (*bubble column*) adalah perangkat yang sederhana dan efektif untuk terjadinya kontak antara udara dan air. Distributor udara (*diffuser*) pada bagian dasar, dapat berbentuk pelat berpori maupun *sparger* (satu atau beberapa cincin yang berlubang-lubang kecil).

Menurut Thoenes, terdapat 3 tipe aliran gelembung udara, yaitu: aliran gelembung homogen (gelembung udara kecil dengan diameter seragam tersebar merata pada cairan), aliran gelembung heterogen (gelembung besar dengan bentuk tidak teratur bergerak cepat ke atas), dan aliran *slug* (gelembung udara terbentuk dengan ukuran sebesar diameter kolom). Towell dkk. (Mashelkar, 1970), mengemukakan bahwa secara umum konsentrasi gelembung udara (ϵ_b) dalam kolom gelembung mencerminkan retensi

gelembung dalam cairan. Konsentrasi gelembung udara (ε_b) dalam kolom merupakan indikasi besarnya waktu tinggal (*residence time*) udara dan luas bidang antar fase efektif. Ellis dan Jones (Mashelkar, 1970) menunjukkan adanya pengaruh dinding ε_b pada diameter sampai 7,5 cm dan untuk diameter lebih besar dari 7,5 cm kandungan udara tidak tergantung pada diameter. Besarnya kandungan udara dalam kolom air yang diberi *sparger* bervariasi tergantung pada kecepatan superfisial gelembung udara (u_s).

Hughmark (Mashelkar, 1970) mengajukan hubungan ε_b dengan *superficial velocity* u_s . Data dianalisa dengan tujuan untuk mendapatkan keadaan kandungan udara. Untuk udara-air, data dapat dihubungkan dengan persamaan sebagai berikut:

$$\varepsilon_b = \frac{u_s}{30 + 2u_s} \quad (1)$$

dengan, ε_b = konsentrasi gelembung udara,
 u_s = kecepatan udara superfisial (cm/s).

Bila efek relatif berat jenis air dan tegangan permukaan diperhitungkan, persamaannya adalah sebagai berikut.

$$\varepsilon_b = \left(\frac{u_s}{30 + 2u_s} \right) \left(\frac{1}{\rho} \right) / \left(\frac{72}{\sigma} \right)^{1/3} \quad (2)$$

dengan, ρ = berat jenis cairan (g/cm^3),
 σ = tegangan permukaan zat cair (dynes/cm).

Pada kolom besar dengan diameter lebih besar dari 0,15 m, variabel – variabel bebas yang penting untuk *holdup* gelembung udara adalah kecepatan gas superfisial (u_s), percepatan gravitasi (g), kekentalan cairan (μ) dan tegangan permukaan (σ). Van Dierendonck (Thoenes, 1994), mengusulkan untuk kolom dengan diameter kolom 0,15 – 2,6 m:

$$\varepsilon_b = 1,2 \cdot \left(\frac{\mu u_s}{\sigma} \right)^{3/4} \cdot Mo^{1/8} \quad (3)$$

dengan Mo adalah bilangan Morton.

Akita dan Yoshida (1974), serta Mersmann (Thoenes, 1994), merumuskan persamaan untuk mencari konsentrasi gelembung udara sebagai berikut.

$$\frac{\varepsilon_b}{(1 - \varepsilon_b)} = c \left(\frac{\mu u_s}{\sigma} \right) Mo^{7/24} \quad (4)$$

$$Mo = \frac{g \cdot \mu^4}{\rho \cdot \sigma^3} \quad (5)$$

dengan, $c = 0,2$ untuk cairan murni dan
 $c = 0,25$ untuk larutan elektrolit.

Mashelkar (1970) mengemukakan bahwa secara umum pada kecepatan superfisial udara rendah ($u_s < 0,5$ cm/s) diameter gelembung sangat tergantung dengan diameter lubang *sparger* dan sedikit tergantung dengan kecepatan udara pada lubang *sparger*. Pada kecepatan sedang ($0,5 < u_s < 10$ cm/s), yang terjadi

sebaliknya dan diameter gelembung merupakan fungsi dari kecepatan udara pada *sparger*. Pada kecepatan superfisial udara yang tinggi ($u_s > 10$ cm/s), baik diameter *sparger* dan kecepatan udara memiliki efek yang kecil terhadap ukuran gelembung.

Howard (1977), mengemukakan bahwa pada kecepatan superfisial udara lebih dari 3 ft/min (1,5 cm/s) ukuran gelembung tidak tergantung aliran gas. Ketika ukuran gelembung membesar sampai 2 mm bentuknya berubah. Pada ukuran diameter gelembung lebih dari 2 mm gelembung mulai berubah menjadi elipsoidal (Davies dan Taylor, 1950). Diameter lebih dari 1 cm berubah menjadi bentuk lensa, bahkan semakin lama menjadi bentuk topi. Persamaan yang sering digunakan untuk memperkirakan diameter gelembung diberikan oleh Van Dierendonck serta Akita dan Yoshida.

- Van Dierendonck (Thoenes, 1994):

$$\frac{d_b^2 \rho g}{\sigma} = C \left(\frac{\mu u_s}{\sigma} \right)^{-0,5} Mo^{-1/4} \quad (6)$$

dengan $C = 6,25$ untuk cairan murni (air maupun cairan organik) dan $C = 2,2$ untuk larutan elektrolit maupun campuran.

- Akita dan Yoshida (Thoenes, 1994):

$$\frac{d_b}{D} = 26 \left(\frac{g D^2 \rho}{\sigma} \right)^{-0,5} \left(\frac{g D^3 \rho^2}{\mu^2} \right)^{-0,12} \left(\frac{u_s}{\sqrt{g D}} \right)^{-0,12} \quad (7)$$

dengan D = diameter kolom.

Diameter ekuivalen adalah diameter gelembung yang dihitung dari volume gelembung yang mempunyai bentuk elipsoidal. Volume gelembung tersebut diasumsikan ekuivalen dengan volume gelembung yang berbentuk bola, yaitu untuk memudahkan penghitungan volume gelembung akibat kesulitan teknis dalam mengukur diameter gelembung elipsoidal secara langsung.

Pada Gambar 1 volume gelembung elipsoidal dapat dihitung sebagai berikut.

$$V = 4/3 \cdot \pi \cdot 1/2 \cdot d_v \cdot 1/2 \cdot d_h \cdot 1/2 \cdot d_h \quad (8)$$

$$V = 1/6 \cdot \pi \cdot d_v \cdot d_h^2 \quad (9)$$

Volume gelembung berbentuk bola dihitung sebagai berikut.

$$V = 4/3 \cdot \pi \cdot 1/8 \cdot d_e^3 \quad (10)$$

Persamaan tersebut dapat dihitung dalam bentuk lain:

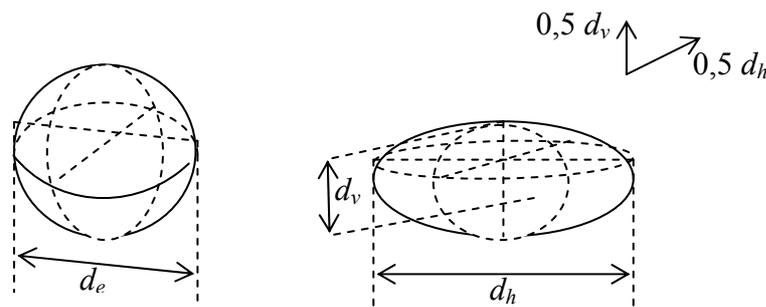
$$d_e^3 = 6 V / \pi \quad (11)$$

Substitusi Persamaan (7) ke dalam Persamaan (9) menghasilkan:

$$d_e^3 = 6 (1/6 \cdot \pi \cdot d_v \cdot d_h^2) / \pi \quad (12)$$

sehingga diameter ekuivalen dihitung sebagai:

$$d_e = (d_v \cdot d_h^2)^{1/3} \quad (13)$$



Gambar 1. Diameter ekuivalen gelembung udara.

Selanjutnya hubungan antara d_v dan d_h diberikan oleh persamaan berikut (Rahardjo dkk, 1999):

$$d_v = 1.4093 \ln(d_h) + 0.859 \quad (14)$$

Sesuai dengan teori 2 lapisan film, koefisien perpindahan massa antar fase gas-cairan ada dua, yaitu koefisien perpindahan massa di lapisan gas (k_G) dan di lapisan cairan (k_L). Untuk gas yang kelutannya di cairan kecil, seperti oksigen di air, yang menentukan adalah koefisien perpindahan massa di cairan (k_L). Beberapa persamaan yang sering digunakan untuk memperkirakan besarnya k_L adalah sebagai berikut.

Calderbank dan Moo-Young untuk $d_b > 2,5$ mm (Thoenes, 1994):

$$k_L = 0,42 \left(\frac{\mu g}{\rho} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu}{\rho D_A} \right)^{-1/2} \quad (15)$$

Sada (Thoenes, 1994):

$$k_L a = K \varepsilon^{0,9} \quad (16)$$

Akita dan Yoshida (Thoenes, 1994):

$$\frac{k_L a D^2}{D_A} = 0,6 \left(\frac{\mu}{\rho D_A} \right)^{0,5} \left(\frac{g D^2 \rho}{\sigma} \right)^{0,62} \left(\frac{g D^3 \rho^2}{\mu^2} \right)^{0,31} \varepsilon^{1,1} \quad (17)$$

Fair (Thoenes, 1994):

$$\frac{k_L a d_b^2}{D_A} = 3,31 \left(\frac{\mu}{\rho D_A} \right)^{0,33} (0,8 d_b \rho u_s)^{0,5} \varepsilon^{0,5} \quad (18)$$

Dengan D_A adalah koefisien difusi di dalam cairan.

Pengukuran laju perpindahan oksigen dari gelembung udara ke air dilakukan melalui pengamatan perubahan konsentrasi Natrium Sulfit yang berada dalam larutan. Hal ini dilakukan karena perubahan konsentrasi oksigen dalam media cair sebelum dan sesudah dialiri gelembung udara sangat cepat dan cepat mencapai kejenuhan sehingga sulit dilakukan pengukuran dengan alat pengukur oksigen terlarut (DO) elektronik maupun dengan metode titrasi. Reaksi Oksigen dengan Natrium Sulfit (Na_2SO_3) di air terjadi sebagai berikut (Chairul, 2001).



Untuk mempercepat reaksi oksidasi, digunakan katalisator garam Cobalt, agar kecepatan reaksi bukan sebagai kecepatan yang mengontrol rangkaian proses transfer dan reaksi secara keseluruhan.

Model yang digunakan menganggap bahwa cairan di semua posisi selalu homogen setiap saat (*mixed flow*), dan konsentrasi Oksigen di gelembung udara dianggap tetap. Penyusunan neraca massa Oksigen dan Natrium Sulfit di cairan menghasilkan:

$$\frac{dc_l}{dt} = K_g a (c_g - H.c_l) - k_r . c_l . c_{\text{Na}_2\text{SO}_3} \quad (19)$$

$$\frac{dc_{\text{Na}_2\text{SO}_3}}{dt} = -k_r . c_l . c_{\text{Na}_2\text{SO}_3} \quad (20)$$

dengan

$K_g a$ = koefisien perpindahan massa Oksigen di permukaan gelembung udara-air,

c_g , c_l = konsentrasi Oksigen di fase gas dan cairan,

H = konstante kesetimbangan Henry,

$c_{\text{Na}_2\text{SO}_3}$ = konsentrasi Natrium Sulfit di air,

k_r = konstante kecepatan reaksi,

$$\text{Dalam hal ini, } \frac{1}{K_g a} = \frac{1}{k_G a} + \frac{H}{k_L a}$$

Untuk gas Oksigen, nilai k_g (koefisien perpindahan massa di film gas) jauh lebih besar daripada k_L , sehingga dapat dianggap $k_L a = H.K_g a$. Persamaan (19) dan (20) diselesaikan secara numerik, dengan nilai k_r dan $K_g a$ dicari secara optimasi dari nilai *Sum of*

$$\text{Square of Errors (SSE)} = \sum (C_{\text{SO}_3, \text{hitung}} - C_{\text{SO}_3, \text{data}})^2$$

CARA PENELITIAN

Bahan-bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah serlak, Natrium Sulfit yang dilarutkan dalam air, garam Cobalt (CoSO_4) sebagai katalisator, dan agar-agar. Serlak yang digunakan berbentuk pipih, kemudian dipecah-pecah dan disaring dengan diameter lubang 1 mm. Air yang dipakai untuk melarutkan Na_2SO_3 adalah air dari kran di laboratorium Teknik Penyehatan, Jurusan Teknik Sipil Universitas Gadjah Mada. Garam Cobalt (CoSO_4) digunakan sebagai katalisator untuk oksidasi Natrium Sulfit. Konsentrasi garam Cobalt yang digunakan dalam larutan adalah sebesar 0,0002 mol/L. Agar-agar digunakan sebagai bahan tiruan lumpur aktif. Agar-agar dipilih karena warnanya yang putih jernih, supaya tidak mengganggu pengamatan gelembung udara secara visual. Lumpur aktif asli berwarna coklat, sehingga saat dicoba digunakan ternyata mengganggu pengamatan visual. Agar-agar ini dibuat dari 7 gram serbuk agar – agar ditambah air 280 ml kemudian dididihkan. Setelah dingin dan membeku lalu ditekan melalui saringan dengan diameter lubang 1 mm. Konsentrasi lumpur aktif dalam pengolahan limbah umumnya berkisar 2000 – 8000 mg/L (Hammer dan Hammer, 2001), dan pada penelitian ini digunakan 8000 mg/L.

Alat yang digunakan dalam percobaan terdiri dari kolom aerator, *sparger*, selang udara, kompresor udara dan pengukur debit udara. Secara skematis dapat dilihat pada Gambar 2.

Kolom aerator terbuat dari kaca dengan tebal 2 mm berbentuk persegi dengan ukuran 95 x 95 x 300 mm. Pada bagian bawah kolom ditutup sedang pada kolom bagian atas terbuka. *Sparger* yang biasa digunakan untuk akuarium dipasang pada bagian dasar kolom aerator. Kompresor udara mempunyai kapasitas pengaliran udara maksimum 20 L/min pada tekanan 0,1 kg/cm². Untuk pengamatan gelembung udara digunakan kamera perekam video, lampu penerang dan kertas berskala. Kamera perekam video yang digunakan adalah *Digital Handycam Panasonic G100 VHS-C Movie Camera NV-G100*. *Capturing rate* adalah 25 frame/sekond (detik). Periode *exposure* terendah adalah 1/120 detik dan yang tertinggi adalah 1/4000 detik. Pada pengambilan gambar dinyalakan lampu penerang 1000 Watt.

Mula-mula kolom aerator diisi dengan air yang mengandung Na_2SO_3 , garam Cobalt dan lumpur aktif tiruan (bila untuk percobaan dengan lumpur aktif). Pada saat awal sebelum aerator dihidupkan, sampel diambil untuk dianalisis kadar sulfitnya dan dihitung sebagai data pada awal proses aerasi. Pengambilan sampel sebanyak 20 ml dilakukan tiap 2 menit dengan jarum suntik. Kadar sulfit dianalisis dengan cara iodometri, menggunakan larutan standar Natrium Tiosulfat (Chairul, 2001).

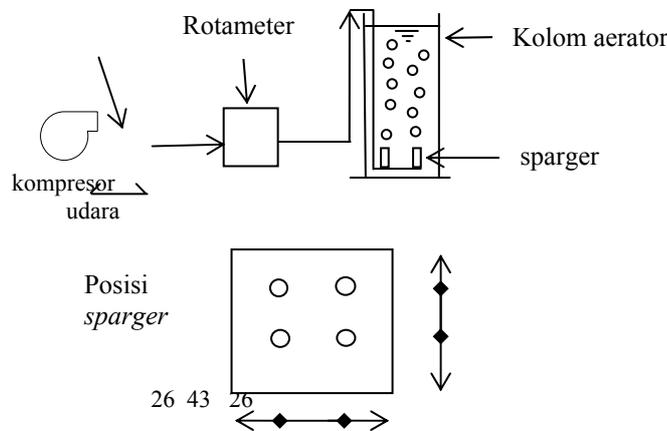
HASIL DAN PEMBAHASAN

Gelembung udara

Kecepatan udara yang dialirkan lewat *sparger* adalah 0,5 – 1 L/min. Pada proses aerasi, konsentrasi dan ukuran gelembung dicoba untuk diamati. Kolom aerasi direkam dengan video, kemudian hasilnya dicoba untuk dianalisis. Hasil rekaman video yang diperoleh ternyata sulit digunakan untuk memperkirakan jumlah atau konsentrasi gelembungnya (*hold up* gas/udara). Hal ini disebabkan oleh banyaknya gelembung yang bayangannya berhimpit-

an satu dengan yang lain. Pada penelitian ini, konsentrasi gelembung (*hold up* udara) kemudian didekati dengan persamaan yang diajukan oleh Hughmark (Mashelkar, 1970). Persamaan ini mempertimbangkan pengaruh viskositas, tegangan muka dan rapat massa zat cair. Hasilnya disajikan pada Tabel 1. Adanya lumpur

tiruan, berdasar persamaan tersebut, tampak hasil hitungan konsentrasi gelembung terpengaruh (meningkat). Dengan adanya padatan lumpur, yang mengakibatkan perubahan parameter viskositas, rapat massa dan tegangan permukaan cairan, konsentrasi gelembung tampak menjadi lebih besar.



Gambar 2. Rangkaian alat percobaan dan posisi sparger di dasar kolom

Pengukuran diameter gelembung dilakukan terhadap hasil rekaman video, dengan menggunakan program *Trace* yang dapat membantu mengukur jarak dalam pixel dan mengkonversikan ke dalam satuan cm atau mm. Pada setiap variasi kecepatan udara, diambil tiga buah gelembung yang dapat terbaca. Masing-masing diameter horizontal gelembung merupakan nilai tengah dari pengukuran diameter gelembung pada waktu yang berbeda. Selisih waktu pengukuran adalah 1/25 detik. Hasil pengukuran ini disajikan pada Tabel 1. Hasil ini menunjukkan bahwa ukuran gelembung tidak berubah banyak pada variasi kecepatan udara dari 0,5 L/min sampai 1 L/min. Hal ini sesuai dengan pendapat Mashelkar (1970), bahwa pada kecepatan superficial rendah ($U_s < 0,5$ cm/s), diameter gelembung sangat tergantung pada diameter lubang sparger, tetapi hanya sedikit tergantung pada kecepatan udara yang mengalir. Bentuk gelembung menjadi elipsoidal, karena diameternya lebih besar dari 2 mm.

Proses aerasi

Konsentrasi sodium sulfid dianalisis menurut prosedur standar pemeriksaan (Clesceri, et al., 1998) pada setiap interval wak-

tu tertentu untuk mengamati kecepatan transfer massa oksigen dari udara ke air. Ada 6 buah pengamatan dengan masing-masing 3 buah untuk proses aerasi terhadap air biasa (tanpa padatan lumpur) dan proses aerasi terhadap air dengan padatan lumpur tiruan. Hasil pengamatan disajikan pada Tabel 2 dan Tabel 3.

Dengan model yang diajukan dalam penelitian ini, koefisien perpindahan massa oksigen dari udara ke air ($K_g a$) dan konstante kecepatan reaksi oksigen dengan sodium sulfid (k_r) dapat ditentukan dengan cara optimasi. Konsentrasi sodium sulfid hasil optimasi (simulasi) cukup dekat dengan konsentrasi data hasil pengamatan yang disajikan pada Tabel 2 dan Tabel 3. Perbedaan minimal yang dapat dicapai memberikan nilai SSE berkisar antara 1 sd. 7×10^{-6} untuk media air tanpa lumpur tiruan dan antara 2 sd. 4×10^{-6} untuk media air dengan lumpur tiruan. Hasil ini disajikan pada Gambar 3, dimana data pengamatan disajikan dalam titik-titik dan hasil simulasi disajikan dalam garis. Nilai $K_g a$ dan k_r hasil evaluasi disajikan pada Tabel 4.

Tabel 1. Konsentrasi dan Diameter Gelembung Udara

Kecepatan udara		Konsentrasi gelembung (ϵ_b)		Diameter rata-rata (mm)
Q (l/min)	U_s (cm/s)	Air	Air-lumpur tiruan	
0,5	0,0923	0,00318	0,00356	3,38
0,75	0,1385	0,00477	0,00528	3,51
1	0,185	0,00631	0,00703	3,65

Tabel 2. Konsentrasi sodium sulfid hasil pengamatan untuk air tanpa lumpur

Waktu (d)	Kecepatan udara		
	0,5 l/min	0,75 l/min	1 l/min
0	0.0498	0.0556	0.0558
120	0.0341	0.0422	0.0417
240	0.028	0.0323	0.0306
360	0.0203	0.024	0.0206
480	0.0128	0.0159	0.0124
600	0.0056	0.0094	0.0056

Tabel 3. Konsentrasi sodium sulfit hasil pengamatan untuk air dengan lumpur tiruan

Waktu (d)	Kecepatan udara		
	0,5 l/min	0,75 l/min	1 l/min
0	0.0533	0.0552	0.0569
120	0.0396	0.0444	0.045
240	0.0305	0.0346	0.0359
360	0.0219	0.0255	0.0249
480	0.0153	0.0184	0.0175
600	0.0095	0.0126	0.0126

Tabel 4. Nilai $K_g a$ dan k_r Hasil Evaluasi

(a) Air tanpa lumpur

Q (l/min)	$K_g a$ (d ⁻¹)	k_r (mol/l) ⁻¹ .d ⁻¹
0,5	0,0103	35,2
0,75	0,0143	23,67
1	0,0167	23,36

(a) Air dengan lumpur tiruan

Q (l/min)	$K_g a$ (d ⁻¹)	k_r (mol/l) ⁻¹ .d ⁻¹
0,5	0,012	28,32
0,75	0,0165	17,9
1	0,0175	17,91

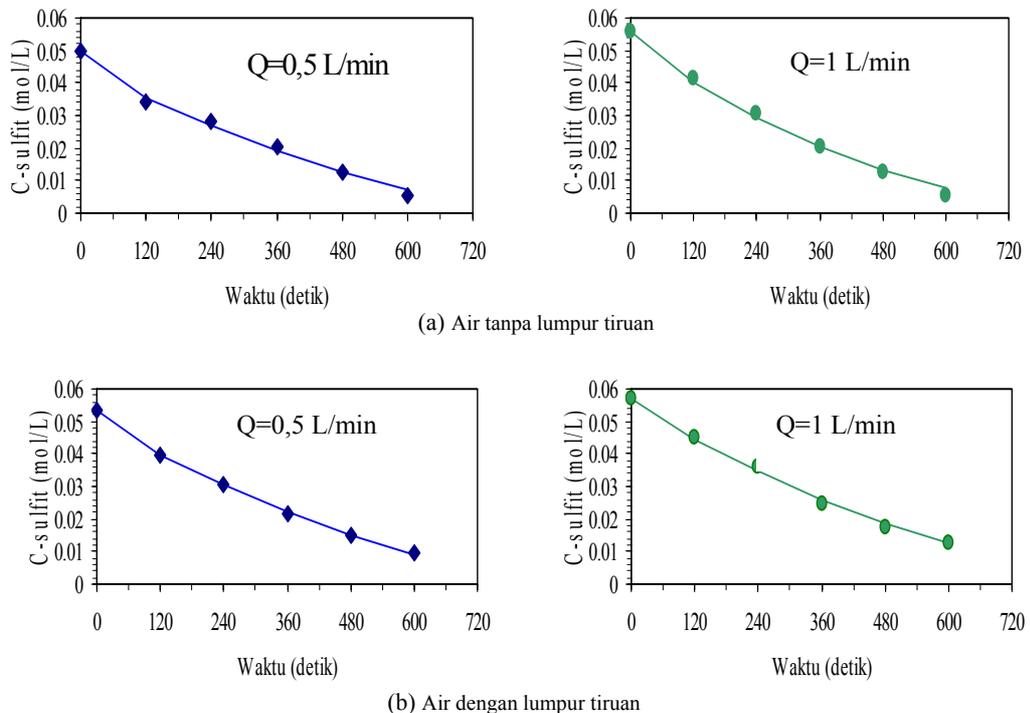
Secara teori, konstante kecepatan reaksi k_r tidak tergantung pada kecepatan aliran udara. Meskipun hasil evaluasi menunjukkan bahwa k_r bervariasi antara 17,9 – 35,2 (mol/l)⁻¹.d⁻¹, hal ini belum cukup meyakinkan bahwa variasi kecepatan udara berpe-

ngaruh terhadap konstante kecepatan reaksi. Hal ini juga diperkuat bahwa pada kecepatan udara 0,75 dan 1 l/min, nilai k_r praktis sama, baik pada aerasi air dan aerasi air dengan padatan lumpur tiruan.

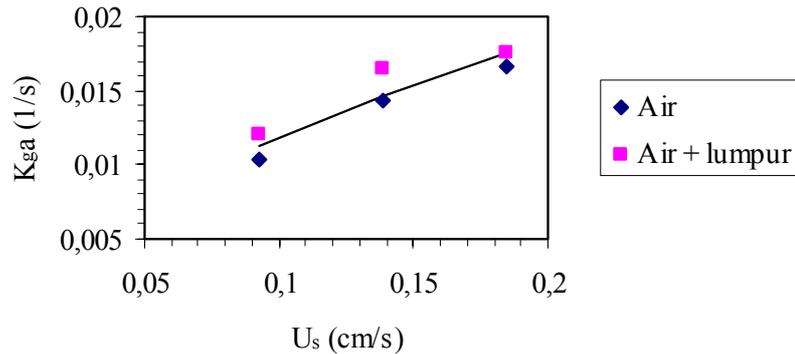
Nilai koefisien perpindahan massa oksigen $K_g a$ tampak tergantung pada kecepatan aliran udara. Pada kisaran kecepatan udara dalam penelitian ini, $K_g a$ bervariasi terhadap Q atau u_s (kecepatan superficial udara). Gambar 4 menyajikan hubungan $K_g a$ dengan u_s . Nilai $K_g a$ untuk aerasi air yang mengandung padatan lumpur tiruan terlihat sedikit lebih tinggi dibanding dengan nilai $K_g a$ untuk aerasi air biasa. Hal ini salah satunya disebabkan oleh konsentrasi gelembung udara (ϵ_b) pada air-lumpur tiruan yang lebih tinggi daripada ϵ_b pada air biasa. Dalam hal ini, luas permukaan spesifik a sebanding dengan ϵ_b . Untuk keperluan praktis, $K_g a$ dapat dinyatakan dalam persamaan :

$$K_g a = 0,0511 \cdot u_s^{0,6324} \text{ d}^{-1}$$

dengan u_s dalam cm/s dan kesalahan rata-rata persamaan ini sebesar 5,88%. Persamaan ini berlaku untuk aerasi terhadap air maupun terhadap air yang mengandung lumpur aktif.



Gambar 3. Konsentrasi sodium sulfit pada beberapa kondisi



Gambar 4. Hubungan K_{ga} dengan kecepatan superficial u_s

Jika dibandingkan dengan hasil kesebandingan rumusan $k_L a$ terhadap kecepatan superficial oleh para peneliti sebelumnya (Tabel 5.), dapat dilihat bahwa hasil penelitian ini dekat dengan hasil yang diperoleh Sada. Sedangkan hasil penelitian Akita dan Yoshida lebih dekat dengan hasil penelitian Fair.

Tabel 5. Pbandingan Hubungan $k_L a$ dengan Kecepatan Superfisial, u_s

Penelitian ini	$k_L a \propto u_s^{0,6324}$
Sada	$k_L a \propto u_s^{0,675}$
Akita dan Yoshida	$k_L a \propto u_s^{1,05}$
Fair	$k_L a \propto u_s^{1,25}$

KESIMPULAN

Penelitian transfer oksigen ini mendapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut ini.

1. Adanya lumpur tiruan, walaupun konsentrasinya relatif kecil, hitungan berdasar persamaan yang diajukan Hughmark (Mashelkar, 1970), menunjukkan bahwa, untuk kecepatan superficial yang sama, konsentrasi gelembung udara atau *hold-up* meningkat.
2. Ukuran gelembung udara (diameter rerata) relatif tetap (3,38 mm – 3,65 mm) untuk perubahan kecepatan superficial antara 0,092 cm/s dan 0,185 cm/s. Hal ini bersesuaian dengan apa yang dikemukakan Mashelkar (1970) bahwa untuk kecepatan superficial di bawah 0,5 cm/s ukuran gelembung lebih ditentukan oleh ukuran lubang *sparger*.
3. Hasil analisis pencarian nilai koefisien perpindahan massa oksigen dipermukaan gelembung udara ke air melalui simulasi numerik neraca massa oksigen dan natrium nitrit yang dioptimalkan dengan data pengukuran mendapatkan bahwa koefisien tersebut dipengaruhi oleh kecepatan superficial dengan hubungan sbb:

$$K_{ga} = 0,0511 \cdot u_s^{0,6324} \text{ d}^{-1}$$

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didukung oleh RUT-VIII. Terima kasih diucapkan pada para asisten yang telah banyak membantu serta pada teman sejawat yang telah memberikan saran dan masukan.

DAFTAR PUSTAKA

Akita, K. dan Yoshida, F., 1974, Bubble Size, Interfacial Area, and Liquid-Phase Mass Transfer Coefficient in Bubble Columns, *Ind. Eng. Chem., Process Des. Develop.*, 13(1), 84-90.

Chairul, 2001, *Perpindahan Massa Gas – Cair dan Flooding dalam Kolom Berpenghalang* Universitas Gadjah Mada.

Clesceri, L.S., Greenberg, A.E., dan Eaton, A.D. (ed.), 1998, *Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water*, Edisi 20, APHA, AWWA, WEF, Washington.

Davies, R.M., dan Taylor, G.I., 1950, The Mechanics of Large Bubbles Rising Through Extended Liquids and Through Liquids in Tubes, *Proc. Royal Society*, London, A200, pp 375-390

Elfida, S., 2003, Pengaruh Konsentrasi Gelembung Udara Terhadap Laju (Transfer) Perpindahan Oksigen Dalam Media Cair Air dan Lumpur Tiruan, *Skripsi*, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Gadjah Mada.

Himawan, A. N., 1999, Studi Gerak Spiral Gelembung Udara Individual dan Sebaran Horizontal Kelompok Gelembung Udara dalam Kolom Aerator, *Skripsi*, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Gadjah Mada.

Hammer, M.J. dan Hammer Jr., M.J, 2001, *Water and Waste Water Technology*, Upper Saddle River, New Jersey, Columbus, Ohio.

Howard, R., 1977, *Chemical Reactor Design for Process Plants*, Vol. 1: Principles and Techniques.

Mashelkar, A. R, 1970, Bubble Columns, *British Chemical Engineering*, 15(10), 1297-1304 .

Pracoyo, A., 2000, Pengukuran Koefisien Transfer Massa Oksigen dengan Kolom Konis pada Aliran Berlawanan, *Tesis*, Minat Studi Teknik Sipil, Jurusan Ilmu – Ilmu Teknik, Program Pasca Sarjana, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.

Purbosani, I., 2001, Pengaruh Konsentrasi Gelembung Udara pada Dispersi Gelembung Udara oleh Dinamika Gerak Spiralnya, *Skripsi*, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Gadjah Mada.

Rahardjo, A.P, Kamulyan, B., Rochmadi, 1999, Bentuk dan Kecepatan Terminal Gelembung Udara Dalam Air, *Forum Teknik* Jilid 23, No.2, Juli.

Sumiadi, 2001, Interaksi Gerak Gelembung Udara dengan Air pada Kolom Aerator, *Tesis*, Minat Studi Teknik Sipil, Jurusan Ilmu – Ilmu Teknik, Program Pasca Sarjana, Universitas Gadjah Mada.

Thoenes, D., 1994, *Course on Two-phase Reactors*, Jurusan Teknik Kimia, UGM, 21-26 Juli 1994.

Wijayanti, Y., 1998, Dinamika Gelembung Udara dalam Kolom Aerator, *Skripsi*, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada.